Neuere Verfahren
zur Hochfrequenz-Spannungsmessung bis etwa 10000 MHz

Verfasser: M. J. O. Strutt, Zürich, Schweiz

V
335—3
DK 621.317.32.029.63

1. Definition des Spannungsbegriffs

Die elektrische Spannung zwischen zwei Punkten ist bekanntlich im elektrostatischen Felde als Linienintegral der elektrischen Feldstärke auf einer beliebig gestalteten Kurve, welche diese zwei Punkte verbindet, definiert. Im Hochfrequenzfeld kann diese Definition nicht ohne weiteres verwendet werden, weil Linienintegrale der genannten Art zwischen zwei festen Endpunkten, anders als im elektrostatischen Felde, nicht von der Verbindungskurve unabhängig sind. Es ist vielmehr notwendig, falls man mit solchen Linienintegralen arbeiten will, die Verbindungskurve genau anzugeben. Diese Sachlage macht eine Verwendung der genannten Definition bei der Messung von Hochfrequenzspannungen im allgemeinen nicht empfehlenswert. Ein möglicher Ausweg besteht darin, daß man sich im Hochfrequenzfelde auf solche geringe Abstände der beiden Meßpunkte, zwischen denen die Spannung bestimmt werden soll, beschränkt, daß das Hochfrequenzfeld zwischen ihnen noch mit großer Annäherung als elektrostatisch gelten kann. Quantitativ heißt dies: Der genannte Abstand soll klein im Vergleich zur Viertelwellenlänge des Feldes im umgebenden Medium sein. Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, ist es vernünftig, an Stelle der Spannung die elektrische Feldstärke zu messen, und wir gelangen dann zur Feldstärkenmessung an Stelle der Spannungsmessung. Im vorliegenden Aufsatz wollen wir uns auf letztere beschränken und somit voraussetzen, daß die genannte Abstandsbedingung möglichst gut erfüllt ist.

2. Diodenvoltmeter

Weiteste Verbreitung haben heute in Spannungsmeßgeräten für den Kurzwellenbereich Dioden gefunden, welche in Diodenvoltmetern verwendet werden. Drei Schaltungen solcher Voltmeter sind in Bild 1 zusammengestellt[6, 7, 9]

a) Fehlerquellen. Als erste Fehlerquelle kommt der komplexe Widerstand der Elektrodenzuleitungen in Frage[1, 10]. Das entsprechende Ersatzschaltbild der Meßdiode ist in Bild 2 dargestellt. Die Klemmen 1 und 2 stellen die äußeren Enden der Elektrodenzuleitungen dar, die Klemmen 1′ und 2′ die Röhrenelektroden im Hochvakuum. Vor allem die Selbstinduktion L der Zuleitungen ist stets unvermeidlich (1 cm Zuleitungsdraht hat z. B. $0{,}8 \cdot 10^{-8}$ H Induktivität). Die Widerstände r der Zuleitungen sind bei Verwendung von Kupfermanteldraht sehr gering, bei Verwendung von Chromeisendraht dagegen beträchtlich. Wir wollen zunächst r vernachlässigen. Dann erhält man auf Grund einer einfachen Rechnung ein Verhältnis der Wechselspannung $\mathfrak{U}_a$ an den Klemmen 1 und 2 zu jener $\mathfrak{U}_d$ zwischen den Klemmen 1′ und 2′:

$$\frac{\mathfrak{U}_a}{\mathfrak{U}_d} = 1 - 2\,\omega^2 L c + j\,\omega\,\frac{2L}{R_d}. \qquad (1)$$

Als Resonanzfrequenz f der Diode bezeichnen wir den Ausdruck $f = 1/2\,\pi\,\sqrt{2\,Lc}$, der in Zahlentafel 1 für einige Dioden angegeben ist.

Zahlentafel 1. **Daten von Meßdioden**

Diode	L (10^{-8} Henry)	c (pF)	f (10^8 Hz)	$\lambda = 3 \cdot 10^8/f$ (m)
1. EAB	5	1,5	3,5	0,86
2. EA 50	1,8	2,1	5,8	0,52
3. Meßdiode 4674	1,5	1,65	7,1	0,42
4. Meßdiode DA 50	0,75	0,24	26,5	0,11

Unter Vernachlässigung des Dämpfungswiderstandes R_d zwischen den Diodenelektroden ist das Verhältnis nach Gl. (1) in Bild 3 für die vier Dioden der Zahlentafel 1 dargestellt. Man kann durch einen einfachen Kunstgriff ein Spannungsverhältnis erhalten, das bis etwas oberhalb der Resonanzfrequenz nahezu gleich 1 bleibt, indem der Dämpfungswiderstand R_d nach der Formel $c\,R_d^2 = 2\,L$ gewählt wird. Das Ergebnis ist in Bild 4 für die Diode $D\,A\,50$ dargestellt. Als Dämpfungs-

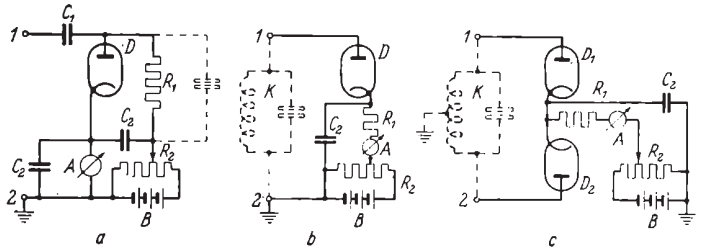

Bild 1. Drei Diodenvoltmeterschaltungen. Bei der Schaltung *a* ist keine äußere leitende Verbindung zwischen den Punkten 1 und 2 vorhanden, bei den Schaltungen *b* und *c* ist eine solche Verbindung wohl vorausgesetzt. *D* Diode, *A* Mikroamperemeter, R_1 Widerstand, etwa 0,1 MOhm für Gleichstrom, C_2 Glimmerkondensator von etwa 1000 pF, R_2 Spannungsteiler, *B* Batterie, C_1 kleiner Anschlußkondensator, z. B. 0,5 pF.

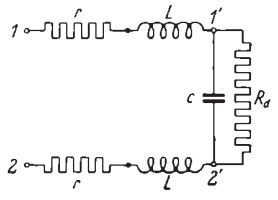

Bild 2. Ersatzschaltbild der Diode zwischen den äußeren Anschlußklemmen 1 und 2. r Widerstand der Anschlußleitungen, L Induktivität dieser Leitungen, c Elektrodenkapazität, R_d Elektrodenwirkwiderstand.

widerstand R_d kann man einen neuzeitlichen Halbleiterwiderstand ganz geringer Abmessungen wählen, wie sie neuerdings in Hochfrequenzgeräten verwendet werden Ein solch kleiner Widerstand vergrößert die Kapazität c nur um einige Hundertstel pF. Man kann übrigens auch versuchen, den Reihenwiderstand r der Zuleitungen nach Bild 2 so zu wählen, daß hierdurch bereits der richtige Dämpfungswiderstand zwischen den Diodenelektroden verursacht wird. Hierzu dient die Formel (2), welche den Dämpfungswiderstand R_d' zwischen 1 und 2 infolge des Reihenwiderstandes r für $R_d = 0$ und $2\omega^2 L c \ll 1$ darstellt:

$$\frac{1}{R_d'} = \frac{2 r \omega^2 c^2}{(1 - 2\omega^2 L c)^2}. \qquad (2)$$

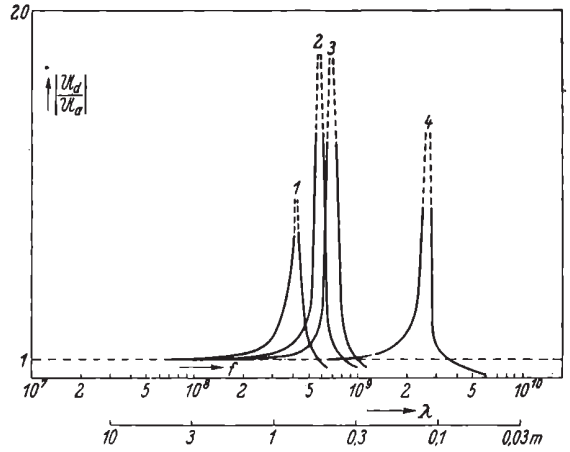

Bild 3. Verhältnis der Wechselspannung $\mathfrak{U}_d$ zwischen den Elektroden (Klemmen 1′ und 2′ von Bild 2) zur Wechselspannung $\mathfrak{U}_a$ zwischen den äußeren Anschlußklemmen als Funktion der Frequenz f und der Wellenlänge λ unter der Annahme: $r = R_d = 0$. Die Zahlen bei den Kurven bezeichnen die gleichen Dioden, wie die entsprechenden Zahlen in Zahlentafel 1.

Für einige Anwendungen ist es auch wichtig, daß die Diode zwischen den Anschlußklemmen 1 und 2 einen möglichst großen Eingangsparallelwiderstand aufweist. Die obigen Formeln zeigen, daß eine kleine Diodenkapazität hierfür günstig wirkt. Die untere Grenze der Dioden kapazität c wird durch das Meßinstrument bedingt, das zur Strommessung verwendet wird (axiale Verkürzung der Elektroden). Die Diode *D* A 50 ist in dieser Beziehung einem Instrument angepaßt, das 1 μA Strom zum vollen Ausschlag braucht.

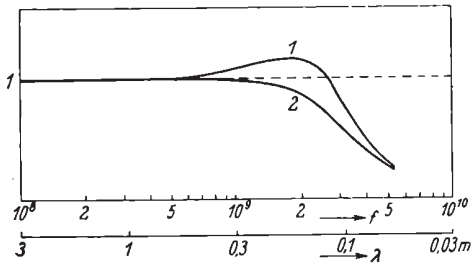

Bild 4. Das gleiche Spannungsverhältnis, wie in Bild 3 für die Diode 4. Kurve 1: $c R_d^3 = 2 L$, Kurve 2: $c R_d^3 = L$. Diese Diode erscheint noch etwas unterhalb 10 cm Wellenlänge brauchbar.

Man könnte die Diodenkapazität auch dadurch verringern, daß der Elektrodenabstand gesteigert würde. Hierdurch gelangt man aber bald in den Bereich des zweiten Meßfehlers von Dioden bei Dezimeterwellen: die Elektronenlaufzeit. In Bild 5 ist der Stromverlauf zwischen den Elektroden einer Diode infolge einer angelegten einwelligen Spannung gezeichnet. Es zeigt sich daß durch diese Ursache der Diodengleichstrom und somit die gemessene Spannung im Dezimeterwellen gebiet zunächst abnimmt nach der Formel:

$$I = I_0 [1 - a_2 (\omega t)^2 + a_4 (\omega t)^4 + \ldots]. \qquad (3)$$

wo I den gemessenen Strom und I_0 den Strom bei niederen Frequenzen darstellen. Die Größe a_2 ist hier positiv. Die Elektronenlaufzeit t hängt von der angelegten Spannung ab und diese zweite Fehlerquelle bedingt somit nicht nur eine Änderung der absoluten Eichung des Diodenvoltmeters, sondern auch eine Änderung der relativen Eichung. Zur Verringerung des Laufzeitfehlers sind möglichst kleine Elektrodenabstände zu verwenden. Aus mechanischen Gründen kann man heute kaum unter etwa 0,1 mm gehen. Eine zylindrische Anordnung der Elektroden hat eine günstige Wirkung auf die Laufzeit: sie ist zwischen einem Draht und einem konzentrischen Zylinder etwas kürzer als zwischen zwei in derselben Entfernung angeordneten parallelen Ebenen. Da die Laufzeit bei den kürzesten Wellen eine Abnahme der gemessenen Spannung und die Resonanz eine Zunahme derselben bedingt, ist es möglich, für bestimmte angelegte Spannungen beide Fehlerquellen so zu wählen, daß ihr Endergebnis auf die Messung sich forthebt. Im Schrifttum[11, 12] angegebene Formeln für den Laufzeitfehler gelten infolge der Vernachlässigung der Elektronenaustrittsgeschwindigkeit aus der Kathode nur angenähert für Spannungen von z. B. > 10 V. Man kann leicht ein-

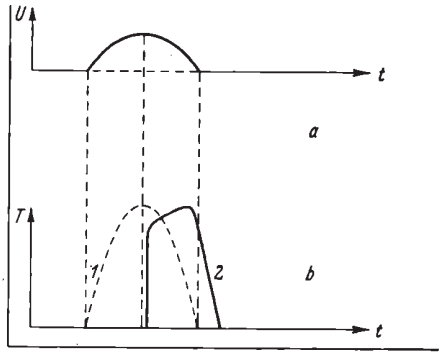

Bild 5. Kurve *a*: Spannung zwischen den Diodenelektroden in der positiven Teilperiode (Spitze einer Sinuskurve). Bild *b*: die entsprechenden Stromkurven als Funktion der Zeit. Kurve 1: ohne Elektronenlaufzeit, Kurve 2: mit beträchtlicher Laufzeit im Vergleich zur Wechselspannungsperiode.

sehen, daß infolge dieser Austrittsgeschwindigkeit der Laufzeitfehler bei sehr kleinen angelegten Spannungen (z. B. unter 1 V) wieder abnehmen muß, und zwar für alle Wellenlängen. Für sehr kleine Spannungen in bezug auf die Temperaturspannung der Kathode (z. B. bei W-Kathoden etwa 0,2 V und bei Oxydpastekathoden etwa 0,1 V) ist daher der Laufzeitfehler bei allen Wellenlängen verhältnismäßig gering.

b) Bau und Anwendung einer neuzeitlichen Meßdiode. Zur Berücksichtigung der im Abschnitt 1 angegebenen Spannungsdefinition müssen die Abmessungen des Diodenvoltmeters möglichst gering sein. Hierdurch werden auch die äußeren Abmessungen der Meßdiode begrenzt. Eine neuzeitliche Ausführung ist in Bild 6 dargestellt. Das Elektrodensystem ist auf einem Ringquetschfuß angeordnet. Die Länge der Zuleitungen ist geringer als 1 cm gehalten, während die Abmessungen

des Elektrodensystems nur einige mm betragen. Als Kathode wird ein Wolframdraht benutzt. Hierdurch wird eine beträchtliche Lebensdauer der Meßdiode (*D* A 50, Philips) gewährleistet.

Neben der Schaltung nach Bild 1 ist vor allem die Gestaltung der Diodenspannungsmesser wichtig. Wir

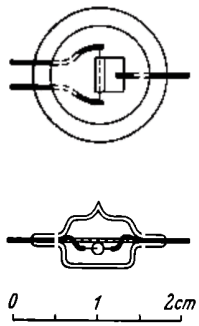

Bild 6. Grund- und Aufriß der Dezimetermeßdiode *D* A 50 (Philips).

geben hier nur ein einziges Beispiel, bei dem die Diode zur Spannungsmessung zwischen zwei parallelen Leitungen verwendet wird. Damit die Meßdiode zwischen diesen Leitungen hin und hergeschoben werden kann, ohne daß hierbei zusätzliche Speiseleitungen bewegt werden müssen, sind die Hochfrequenzleitungen aus je zwei, durch eine dünne Isolationsschicht getrennten Leitern gebildet. Der Gleichstromteil der Schaltung befindet sich hinter einem Kurzschluß der Hochfrequenzleitung und beeinflußt somit die Vorgänge auf derselben nicht (Bild 7). Die Diode selber wird bei der beschriebenen Anordnung auf einem Bügel aus Polystyren, einem glashellen Kunstharz, angeordnet (Bild 8).

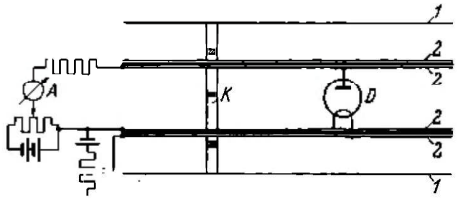

Bild 7. Anordnung der Meßdiode *D* auf einer Lecherleitung. Jede Leitung 2 besteht aus zwei in bezug auf Gleichstrom isolierten Hälften, während eine leitende Abschirmhülle 1 die ganze Leitung umschließt. Hinter dem Kurzschluß *K*, welcher aus einigen gleichstrommäßig isolierten Teilen besteht, befindet sich die Gleichstromschaltung des Voltmeters mit dem Anzeigeinstrument *A*.

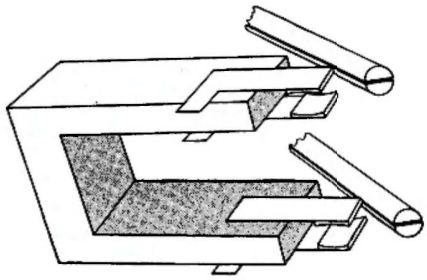

Bild 8. Bügel aus Isolationsstoff, auf dem Kontaktfedern angeordnet sind, zwischen denen die Meßdiode eingelötet wird. Die Federn gleiten entlang der angegebenen Lecherleitung.

3. Meßverfahren, welche auf einer Strommessung beruhen

Die weiteren Meßverfahren zur Spannungsbestimmung beruhen auf einer Strommessung.

a) Haardrahtvoltmeter nach A. Ditl[3]. Dieses Voltmeter arbeitet so, daß der elektrische Strom einen dünnen Draht erwärmt, dessen Widerstandserhöhung mit Hilfe einer Gleichstrombrücke bestimmt wird. Bild 9 gibt einen Querschnitt des Gerätes. Es wurden Platindrähte von 1 ·· 2 μm Dmr. mit einem Widerstand von

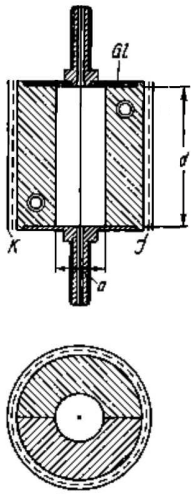

Bild 9. Haardrahtvoltmeter nach A. Ditl. Abmessungen: a = 4 mm, d = 13 mm. *J* Polystyrolisolation, *K* Kupferfolie, *Gl* Glimmerplatte.

etwa 1800 ··· 460 Ohm/cm benutzt. Die kürzeste Wellenlänge, bei der gemessen wurde, war 20 cm. Als Fehlerquellen, welche die Eichung des Gerätes mit Niederfrequenzspannung im Dezimeterwellenbereich ändern können, kommen in Frage: Fehler durch Skineffekt. Dieser ist für die kürzeste Welle weniger als 0,1%. Der Fehler infolge Strahlung am freien (oberen) Ende des Gerätes ist nur $3 \cdot 10^{-6}$%. Infolge der Selbstinduktivität des Platindrahtes von 1 μm Dmr. entsteht ein Fehler von etwa 0,4%, für den dickeren Draht ein Fehler von etwa 4,9%. Infolge ungleichmäßiger Stromverteilung tritt bei der kürzesten Welle beim dünnsten Draht ein Fehler von 4,1% auf. Beim dünnsten Draht beträgt der Wirkwiderstand des Gerätes mehr als 2 kOhm. Mit Hilfe dieses Haardrahtvoltmeters wurden Diodenvoltmeter geeicht, welche mit verschiedenen Dioden gebaut waren. Es ist allerdings nicht ersichtlich, ob bei den kürzesten Wellen die Eichvorrichtung insgesamt genügend kleine Abmessungen aufweist, um die zu vergleichenden Spannungen eindeutig festzulegen. Vergleiche hierzu den obigen Abschnitt 1.

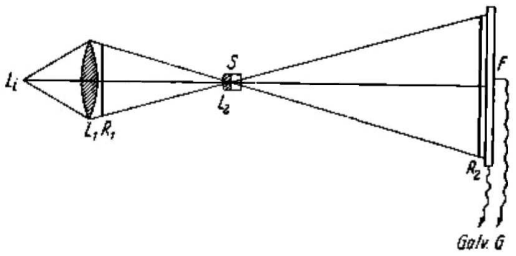

Bild 10. Meßgerät nach J. Malsch und W. Frings. Beschreibung im Text.

b) Meßgerät nach J. Malsch und W. Frings[4]. Dieses Meßverfahren beruht darauf, daß die Dichteverteilung der Luft sich in der Umgebung eines geheizten Drahtes ändert. Die Dichteänderung wird optisch gemessen.

Das Gerät ist schematisch in Bild 10 dargestellt. Ein Strichraster R_1 wird durch die Linse L_2 auf einen zweiten Raster R_2 so abgebildet, daß hinter R_2 Dunkelheit herrscht. Erzeugt man an der Stelle S in der angegebenen Weise eine Dichteänderung, so werden die Lichtstrahlen abgelenkt und tritt hinter R_2 Aufhellung ein. Diese wird mit einer Photozelle nebst Galvanometer gemessen. Die Lichtquelle L_i wird von der Linse L_1 ungefähr bei S abgebildet. Größte Empfindlichkeit wird erreicht, wenn die Aufhellung oder Verdunkelung von einer bestimmten mittleren Helligkeit aus gemessen wird. Den Nullstrom der Photozelle F sowie den Einfluß von Lichtschwankungen der Lichtquelle kann man vermeiden, indem ein Differentialphotoelement benutzt wird, wobei der Raster so aufgeteilt ist, daß bei Stromdurchgang durch den Heizdraht die eine Zellenhälfte aufgehellt, die andere verdunkelt wird. Hinter der Photozelle wird ein zweistufiger Verstärker benutzt; das ganze Gerät besitzt eine handliche Form. Bis 3 m Wellenlänge herab erscheint das Gerät brauchbar, mit Fehlern, welche wenige Prozent nicht übersteigen.

c) Meßgerät nach F. Braune[5]. Das Gerät enthält einen 5 cm langen, 15 μm starken geraden Manganindraht als Hitzdraht und einen gleich langen, sehr dünnen Glasfaden, der in einem Abstand von etwa 0,4 ··· 0,5 mm parallel zum Hitzdraht ausgespannt ist. In der Mitte der Fäden ist ein kleiner Spiegel unsymmetrisch aufgekittet. Zur Vermeidung von Wirbelströmen wurde kein Silberspiegel, sondern ein 0,15 mm dickes und $5 \cdot 12$ mm^2 großes Stückchen Schwarzglas verwendet. Das Gerät ist bis einige Meter Wellenlänge herab brauchbar.

d) Meßgerät nach A. Scheibe. Eine Ausführung dieses Gerätes wurde bereits früher ausführlich beschrieben[1, 8, 9]. Brauchbar bis etwa 10 cm herab.

e) Thermokreuze[1, 8, 9]. Auch diese wurden bereits früher nebst Fehlerquellen ausführlich beschrieben.

f) Thermistoren[13]. Geeignete Halbleiterwiderstände werden infolge von Stromdurchgang erhitzt und ändern dabei ihren Widerstandswert in vorausbestimmter Weise. Durch Messung des Widerstandes wird der Strom bestimmt und hieraus die effektive Spannung zwischen den Enden des Widerstandes.

g) Kristalldetektoren[14]. Neuere Kristalldetektoren gestatten Strommessungen bis ins Zentimeterwellengebiet und können mit Hilfe geeigneter Sonden als Spannungsmesser verwendet werden.

4. Gegenseitige Eichung verschiedener Geräte[6, 7, 8, 9]

a) Absolute Eichung. Bei dieser Eichung muß vor allen Dingen die Sicherheit bestehen, daß die Ströme durch die verschiedenen Geräte gleich sind oder aber in einem bekannten Verhältnis stehen. Beim Vergleich eines Strommessers mit einem Spannungsmesser muß in jedem Fall noch der Widerstand bekannt sein, durch den der Strom fließt, während weiterhin die Spannung an den Klemmen dieses Widerstandes in einem bekannten Verhältnis zur Spannung an den Klemmen des Voltmeters stehen muß. Gegenseitige Eichungen von Thermokreuzen und einem Gerät nach A. Scheibe, welche diesen Bedingungen genügen, wurden bereits früher bis etwa 20 cm Wellenlänge herab beschrieben[9]. Mit Hilfe einer geeigneten Lecherbrückenanordnung, welche ebenfalls bereits beschrieben wurde, gelingt es auch, eine gegenseitige Eichung von Diodenvoltmetern und Thermokreuzen oder Scheibeschen Geräten bis zu dieser Wellenlänge durchzuführen. Diese absoluten Eichungen können neue Aufschlüsse über die Laufzeiterscheinungen in Dioden bringen[8, 9].

b) Relative Eichungen. Für die meisten Meßzwecke genügt eine relative Eichung der Spannungsmeßgeräte. Hierzu sind bisher zwei Verfahren verwendet worden. Beim ersten Verfahren geht man davon aus, daß die Resonanzkurve eines Schwingungskreises oder aber der Spannungsverlauf entlang einer Lecherbrücke eine theoretisch genau bekannte Gestalt haben. Eine Messung dieser Kurvenform mit einem vorgelegten Diodenvoltmeter erlaubt ohne weiteres die Bestimmung einer relativen Eichkurve desselben. Indem diese Eichkurve dann auf verschiedene Teile der ursprünglich gemessenen Spannungskurve angewandt wird, ergeben sich sogar mehrere Kontrollmöglichkeiten.

Beim zweiten Verfahren wird ein relativ oder absolut geeichtes Strommeßgerät (z. B. Thermokreuz) verwendet. Man kann dieses Gerät in der Nähe des Senders anordnen und dann die Schwingstärke des Senders ändern. Indem man die Ausschläge des Diodenvoltmeters, das an einer vom Sender entfernten Stelle angeordnet sein kann, gegen die Wechselströme abträgt, welche mit dem Strommeßgerät bestimmt werden, entsteht unmittelbar eine relative Eichkurve des Voltmeters. Man muß bei diesem Verfahren darauf achten, daß die Senderfrequenz sich nur in so engen Grenzen ändert, daß hierdurch keine Meßfehler des Strommessers gegenüber dem Spannungsmesser infolge irgendwelcher Resonanzerscheinungen entstehen können.

Relative Eichungen können auch zur Beurteilung des Laufzeitfehlers benutzt werden, da derselbe spannungsabhängig ist. Daher könnten solche Eichkurven für lange und sehr kurze Wellen, sobald beträchtliche Laufzeitfehler vorhanden wären, nicht zur Deckung gebracht werden. Bei kleinen Wechselspannungen($<0{,}2$V) für die Diode D A 50 (vgl. Zahlentafel 1) ausgeführte Eichungen ergaben nach diesem Verfahren bis etwa 20 cm Wellenlänge herab keine beträchtlichen Laufzeitfehler.

Schrifttum

1. M. J. O. Strutt, ATM-Blatt V 324—4 (März 1941). — 2. G. Möhring, Z. Hochfrequenztechn. 58 (1941), S. 57. — 3. A. Ditl, Z. Hochfrequenztechn. 58 (1941), S. 32. — 4. J. Malsch u. W. Frings, Z. techn. Physik 23 (1942), S. 50. — 5. F. Braune, Z. techn. Physik 23 (1942), S. 53. — 6. M. J. O. Strutt u. A. van der Ziel, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (1935), S. 347. — 7. M. J. O. Strutt u. A. van der Ziel, Elektr. Nachr.-Techn. 14 (1937), S. 75. — 8. M. J. O. Strutt u. K. S. Knol, Physica 5 (1938), S. 205. — 9. M. J. O. Strutt u. K. S. Knol, Z. Hochfrequenztechn. 53 (1939), S. 187. — 10. M. J. O. Strutt u. K. S. Knol, Philips techn. Rdsch. 7 (1942), S. 124. — 11. L. S. Nergaard, Proc. Inst. Radio Engs. 24 (1936), S. 1207. — 12. H. Boucke u. H. Lennartz, Funk H. 17/18 (1942), S. 241. — 13. J. A. Becker, C. B. Green und G. L. Pearson, Bell Syst. techn. Journ. 26 (1947), S. 170. — 14. L. W. Morrison, Bell Syst. techn. Journ. 26 (1947), S. 716.